

IAP20 Rec'd PCT/PTO 10 JAN 2006

## BESCHREIBUNG

Verfahren und Vorrichtung zur Strombegrenzung mit einem selbstbetätigten Strombegrenzer

## TECHNISCHES GEBIET

- 5 Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Primärtechnik für elektrische Schaltanlagen, insbesondere der Begrenzung von Fehlerströmen in Hoch-, Mittel- oder Niederspannungsschaltanlagen. Sie geht aus von einem Verfahren und einer Vorrichtung zur Strombegrenzung sowie von einer  
10 Schaltanlage mit einer solchen Vorrichtung gemäss Oberbegriff der unabhängigen Patentansprüche.

## STAND DER TECHNIK

In der DE 40 12 385 A1 wird eine stromgesteuerte Abschaltvorrichtung offenbart, deren Funktionsprinzip auf dem  
15 Pinch-Effekt mit Flüssigmetall beruht. Zwischen zwei Festmetallelektroden ist ein einzelner, schmaler, mit Flüssigmetall gefüllter Kanal angeordnet. Bei Überstrom wird der flüssige Leiter infolge der elektromagnetischen Kraft durch Pinch-Effekt zusammengezogen, so dass der Strom  
20 selbst den flüssigen Leiter abschnürt und trennt. Das verdrängte Flüssigmetall wird in einem Vorratsbehälter gesammelt und fliesst nach dem Überstromereignis wieder zurück. Die Kontakttrennung erfolgt ohne Lichtbogen. Jedoch ist die Einrichtung nur für relativ kleine Ströme, geringe  
25 Spannungen und langsame Abschaltzeiten geeignet und bietet keinen dauerhaften Ausschaltzustand.

In der DE 26 52 506 wird ein elektrischer Hochstromschalter mit Flüssigmetall offenbart. Einerseits wird eine Flüssigmetallmischung zur Benetzung von Festmetallelektroden und zur Herabsetzung des Kontaktwiderstands verwendet.  
30 Dabei wird das Flüssigmetall durch mechanische Verdrän-

gung, z. B. durch bewegliche Kontakte oder pneumatisch angetriebene Tauchkolben, entgegen der Schwerkraft in den Kontaktpalt getrieben. Durch Pinch-Effekt, gemäss dem ein stromführender Leiter durch den ihn durchfliessenden Strom  
5 eine radiale Striktion erfährt, kann das Flüssigmetall zusätzlich im Kontaktpalt stabilisiert und festgehalten werden. Äussere Magnetfelder und magnetische Streuflüsse, z. B. durch die Stromzuführungen, können im Flüssigmetall Strömungsinstabilitäten verursachen und werden abgeschirmt  
10 und gegebenenfalls beim Ausschalten zugelassen, um das Löschen des Lichtbogens im Flüssigmetall zu unterstützen. Nachteilig ist, dass eine graduelle Strombegrenzung nicht möglich ist und Lichtbogen zwischen den Festelektroden Oxidation im Flüssigmetall verursachen. Die Konstruktion  
15 des Hochstromschalters umfasst Dichtungen für Flüssigmetall, inertes Gas oder Vakuum und ist entsprechend aufwendig.

In der DE 199 03 939 A1 wird eine selbsterholende Strombegrenzungseinrichtung mit Flüssigmetall offenbart. Zwischen zwei Festmetallelektroden ist ein druckfestes Isoliergehäuse angeordnet, in dem Flüssigmetall in Verdichterräumen und in dazwischenliegenden, die Verdichterräume verbindenden Verbindungskanälen angeordnet ist, so dass ein Strompfad für Nominalströme zwischen den Festelektroden  
20 gegeben ist. In den Verbindungskanälen ist der Strompfad gegenüber den Verdichterräumen eingeengt. Die Verbindungskanäle werden bei Kurzschlussströmen stark erhitzt und scheiden ein Gas aus. Durch lawinenartige Gasblasenbildung in den Verbindungskanälen verdampft das Flüssigmetall in die Verdichterräume, so dass in den nun flüssigmetallentleerten Verbindungskanälen ein strombegrenzender Lichtbogen gezündet wird. Nach Abklingen des Überstroms kann das Flüssigmetall wieder kondensieren und der Strompfad ist wieder betriebsbereit.  
30

35 In der WO 00/77811 ist eine Fortbildung der selbsterholenden Strombegrenzungseinrichtung offenbart. Die Verbindungskanäle sind nach oben konisch verbreitert, so dass

die Füllstandshöhe des Flüssigmetalls variiert und die Nennstromtragfähigkeit über einen grossen Bereich verändert werden kann. Ausserdem wird durch eine versetzte Anordnung der Verbindungskanäle ein mäanderförmiger Strompfad gebildet, so dass bei überstrombedingtem Verdampfen des Flüssigmetalls eine Serie strombegrenzender Lichtbögen gezündet wird. Derartige Pinch-Effekt Strombegrenzer benötigen einen hinsichtlich Druck und Temperatur sehr stabilen Aufbau, was konstruktiv aufwendig ist. Durch die Strombegrenzung per Lichtbogen tritt grosser Verschleiss im Innern des Strombegrenzers auf und Abbrandrückstände können das Flüssigmetall kontaminieren. Durch die Rekondensation des Flüssigmetalls stellt sich unmittelbar nach einem Kurzschluss wieder ein leitfähiger Zustand ein, so dass kein Ausschaltzustand vorhanden ist.

In der GB 1 206 786 wird ein elektrischer Hochstromschalter auf Flüssigmetallbasis offenbart. Das Flüssigmetall bildet in einer ersten Position einen ersten Strompfad für den Betriebsstrom und wird beim Stromschalten entlang eines Widerstandselements geführt und in eine zweite Position gebracht, in welcher es in Serie mit dem Widerstandselement liegt und den Strom auf einen kleinen Bruchteil reduziert. Der Hochstromschalter ist zur Erzeugung hochintensiver Strompulse im Mega-Ampere und sub-Millisekunden Bereich zur Plasmagenerierung konzipiert.

In dem U. S. Pat. No. 4,599,671 wird eine Vorrichtung zur selbsttätigen Strombegrenzung gemäss Oberbegriff der unabhängigen Ansprüche offenbart. Eine bewegliche Elektrode ist in Form eines auf Schienen fahrbaren Schlittens realisiert, der durch Kurzschlussströme elektromagnetisch auslenkbar ist. Im ausgelenkten Zustand kontaktiert der Schlitten einen Schienenbereich, der einen strombegrenzenden elektrischen Widerstand für den Strompfad aufweist. Statt fahrbarer Schlitten kann auch eine in einem Kanal leicht bewegliche Flüssigmetallsäule als bewegliche Elektrode dienen. Der Strombegrenzer besitzt wiederum keinen Ausschaltzustand, sondern ist in Serie zu einem Leistungsschalter angeordnet, um den Strom zunächst zu begrenzen und dann vollständig abzuschalten.

## DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren, eine Vorrichtung und eine elektrische Schaltanlage mit einer solchen Vorrichtung zur verbesserten und vereinfachten Strombegrenzung und Stromabschaltung anzugeben. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst.

In einem ersten Aspekt besteht die Erfindung in einem Verfahren zur Strombegrenzung mit einer Strombegrenzungsvorrichtung, die feststehende Elektroden und mindestens eine bewegliche Elektrode umfasst, wobei in einem ersten Betriebszustand zwischen den feststehenden Elektroden ein Betriebsstrom auf einem ersten Strompfad durch die Strombegrenzungsvorrichtung geführt wird und der erste Strompfad zumindest teilweise durch die in einer ersten Position befindliche bewegliche Elektrode geführt wird, wobei in einem zweiten Betriebszustand die mindestens eine bewegliche Elektrode selbsttätig durch eine elektromagnetische Wechselwirkung mit dem zu begrenzenden Überstrom entlang einer Bewegungsrichtung in mindestens eine zweite Position bewegt wird, die bewegliche Elektrode bei einem Übergang von der ersten Position zur zweiten Position entlang eines Widerstandselements geführt wird und in der mindestens einen zweiten Position in Serie mit dem Widerstandselement liegt und dadurch ein strombegrenzender zweiter Strompfad durch die Strombegrenzungsvorrichtung gebildet wird, der einen vorgebbaren elektrischen Widerstand aufweist, wobei ferner in einem dritten Betriebszustand die bewegliche Elektrode in Serie mit einem Isolator liegt und dadurch eine Isolationsstrecke zur Leistungsabschaltung durch die Vorrichtung gebildet wird. Erfindungsgemäss wird also eine besonders einfache Konfiguration für einen selbsttätigen strombegrenzenden Schalter oder Strombegrenzer mit integriertem Schalter angegeben. Der Überstrom selber löst die Strombegrenzung aus. Als zugrundeliegende elektromagnetische Wechselwirkung kommt z. B. die Lorenzkraft auf einen



stromführenden Leiter in einem Magnetfeld in Frage, aber auch eine kapazitive, induktive, elektrostatische oder anderweitig elektromagnetische Einwirkung des Überstroms auf den beweglichen Leiterabschnitt oder die bewegliche Elektrode sind denkbar. Da von der beweglichen Elektrode im Strombegrenzungsfall kein Isolator, sondern ein elektrischer Widerstand kontaktiert wird, wird kein Lichtbogen gezündet. Daher kann das Strombegrenzungsverfahren auch bei sehr hohen Spannungsniveaus eingesetzt werden. Zudem tritt kaum Verschleiss durch Abbrand oder durch Korrosion der beweglichen Elektrode auf. Die Strombegrenzung erfolgt reversibel und ist daher wartungsfreundlich und kostengünstig.

In einem ersten Ausführungsbeispiel wird der dritte Betriebszustand durch einen Abschaltbefehl ausgelöst, durch den ein externes Magnetfeld zwischen einem Betrieb der Vorrichtung als Strombegrenzer und als Leistungsschalter umgeschaltet wird.

In einem weiteren Ausführungsbeispiel wird in dem dritten Betriebszustand die bewegliche Elektrode entlang einer entgegengesetzten Bewegungsrichtung in mindestens eine dritte Position bewegt und liegt in der mindestens einen dritten Position in Serie mit dem Isolator.

In einem anderen Ausführungsbeispiel wird die bewegliche Elektrode selbsttätig durch die elektromagnetische Wechselwirkung mit dem zu begrenzenden Überstrom entlang des Widerstandselements zu einer extremalen zweiten Position geführt, wobei die extremale zweite Position in einem Bereich liegt, wo das Widerstandselement in einen Isolator übergeht, so dass die oder eine weitere Isolationsstrecke zur Stromabschaltung gebildet wird.

In einem anderen Ausführungsbeispiel wird das Widerstandselement zur Erzielung einer sanften Abschaltcharakteristik mit einem entlang der Bewegungsrichtung der beweglichen Elektrode nichtlinear ansteigenden elektrischen Widerstand für den zweiten Strompfad gewählt; und/oder das Wider-

standselement ist ohmsch und der elektrische Widerstand steigt kontinuierlich mit der zweiten Position an. Auf diese Weise wird eine sanfte Strombegrenzungscharakteristik für eine progressive Strombegrenzung realisiert.

- 5 Das Ausführungsbeispiel gemäss Anspruch 6 hat den Vorteil, dass das Magnetfeld unmittelbar auf die stromdurchflossene bewegliche Elektrode einwirkt und diese durch die Lorenzkraft in Bewegung setzt. Die Lorenzkraft ist proportional zum Produkt aus Magnetfeldstärke und Strom. Das Magnetfeld  
10 kann extern, insbesondere konstant oder schaltbar, oder intern, insbesondere durch den zu begrenzenden Strom, erzeugt sein. Durch Ausbalancieren der Lorenzkraft und einer geeigneten Rückstellkraft kann die resultierende Bewegung an den zu begrenzenden Überstrom und an die für den benötigten elektrischen Widerstand erforderliche Elektroden-  
15 auslenkung angepasst werden.

Anspruch 7 gibt Dimensionierungskriterien zur optimalen Auslegung der Dynamik des Strombegrenzungsvorgangs an.

- Anspruch 8 und 9 geben vorteilhafte Ausführungsbeispiele  
20 mit einem Flüssigmetall und/oder einem Schleifkontakt-Festkörperleiter als bewegliche Elektrode an. Insbesondere können durch eine Serieschaltung von Flüssigmetallsäulen abwechselnd mit einem Dielektrikum auch hohe Spannungen und hohe Ströme effizient und sicher gehandhabt werden.

- 25 In einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Strombegrenzung, insbesondere zur Ausführung des Verfahrens, umfassend feststehende Elektroden und mindestens eine bewegliche Elektrode, wobei in einem ersten Betriebszustand zwischen den feststehende Elektroden ein  
30 erster Strompfad für einen Betriebsstrom durch die Strombegrenzungsvorrichtung vorhanden ist und der erste Strompfad zumindest teilweise durch die in einer ersten Position befindliche bewegliche Elektrode führt, wobei elektromagnetische Antriebsmittel zum bei Überstrom  
35 selbstbetätigten Bewegen der beweglichen Elektrode entlang einer Bewegungsrichtung in mindestens eine zweite Position

vorhanden sind, elektrische Widerstandsmittel mit einem vorgebbaren elektrischen Widerstand vorhanden sind und in einem zweiten Betriebszustand die bewegliche Elektrode zumindest teilweise in Serie zu den Widerstandsmitteln liegt und zusammen mit diesen einen zweiten Strompfad bildet, auf dem der Betriebsstrom auf einen zu begrenzenden Strom begrenztbar ist, wobei in einem dritten Betriebszustand die bewegliche Elektrode in Serie mit einem Isolator liegt und dadurch eine Isolationsstrecke zur Leistungsabschaltung durch die Vorrichtung vorhanden ist.

Weitere Ausführungen, Vorteile und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus abhängigen Ansprüchen sowie aus der nun folgenden Beschreibung und den Figuren.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

- Fig. 1a, 1b zeigen eine erfindungsgemäss selbstbetätigte Strombegrenzungseinrichtung mit Flüssigmetall bei Nennstrombetrieb und im Strombegrenzungsfall;
- Fig. 2, 3 zeigen zwei erfindungsgemäss selbstbetätigte Strombegrenzungseinrichtungen mit mechanischem Schleifkontakt im Nennstrombetrieb (strichpunktiert) und im Strombegrenzungsfall;
- Fig. 4 zeigt einen strombegrenzenden Schalter mit Einfangmechanismus für Flüssigmetall bei Nennstrombetrieb;
- Fig. 5 zeigt eine Kurvendarstellung der Variation des Widerstands des Strombegrenzers als Funktion der Position der Flüssigmetallsäule; und
- Fig. 6 zeigt einen kombinierten Flüssigmetall-Strombegrenzer und Flüssigmetall-Leistungsschalter mit externem Magnetfeldantrieb für das Flüssigmetall.

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

## WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Fig. 1a, 1b zeigen ein Ausführungsbeispiel eines Flüssigmetall-Strombegrenzers 1. Der Strombegrenzer 1 umfasst Festmetall-Elektroden 2a, 2b und Zwischenelektroden 2c für eine Stromzuführung 20 und einen Behälter 4 für das Flüssigmetall 3. Der Behälter 4 hat einen Boden 6 und Deckel 6 aus Isolatormaterial, zwischen denen ein elektrisches Widerstandsmittel 5 mit mindestens einem Kanal 3a für das Flüssigmetall 3 angeordnet ist. Über der Flüssigmetallsäule 3 kann beispielsweise ein Schutzgas, eine Isolierflüssigkeit (mit hier nicht dargestelltem Ausweichvolumen) oder Vakuum angeordnet sein.

Erfindungsgemäss wird das Flüssigmetall 3 oder allgemein eine bewegliche Elektrode 3, 3' durch eine selbsttätige, elektromagnetische Wechselwirkung mit dem zu begrenzenden Überstrom  $I_2$  in Bewegung versetzt. Im Falle des Flüssigmetalls 3 verbleibt dieses im flüssigen Aggregatzustand und wird durch die erzwungene Bewegung gezielt zwischen den unterschiedlichen Positionen  $x_1$ ,  $x_{12}$  oder  $x_2$  bewegt. Der Pinch-Effekt wird dabei nicht genutzt. Sehr schnelle Strombegrenzungs-Reaktionszeiten von bis zu unter 1 ms sind erzielbar. Zudem ist zusätzlich zum Nennstrompfad 30 und zum Strombegrenzungspfad 31 eine Isolationsstrecke 32 vorhanden.

Bevorzugt wird der zweite Betriebszustand durch den Überstrom  $I_2$  selbsttätig aktiviert, indem die stromdurchflossene bewegliche Elektrode 3, 3' durch eine elektromagnetische Kraft  $F_{\text{mag}}$  bewegt wird, die senkrecht zum Strom  $I_2$  durch die bewegliche Elektrode 3, 3' und senkrecht zu einem Magnetfeld  $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$  steht und die eine Kraftkomponente parallel zur Bewegungsrichtung  $x$ , 1 aufweist, wobei das Magnetfeld  $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$  als ein externes Magnetfeld  $B_{\text{ext}}$  und/oder als ein internes, von einer Stromzuführung 2a, 2b; 20 zur Strombegrenzungsvorrichtung 1 erzeugtes Magnetfeld  $B_{\text{int}}$  gewählt wird. Alternativ zur Lorenzkraft kann auch eine andere selbsttätige elektromagnetische Wechsel-



wirkung mit dem Überstrom  $I_2$ , z. B. eine kapazitive, induktive, elektrostatische oder anderweitige Wechselwirkung, zur Strombegrenzung verwendet werden. Dabei bedeutet selbsttätig, dass ohne aktive Strommessung und ohne aktive  
5 Regelungstechnik die Bewegung der beweglichen Elektrode ausgelöst und kontrolliert wird.

In einem ersten Betriebszustand (Fig. 1a) fließt ein Betriebs- oder Nennstrom  $I_1$  auf einem ersten oder Nennstrompfad 30 von der Eingangselektrode 2a via Flüssigmetall 3  
10 und gegebenenfalls Zwischenelektroden 2c zur Abgangselektrode 2b. Dabei befindet sich das Flüssigmetall 3 in der ersten Position  $x_1$ , benetzt zumindest teilweise die feststehenden Elektroden 2a, 2b, 2c und überbrückt elektrisch leitend die Kanäle 3a. In einem zweiten Betriebszustand  
15 (Fig. 1b) wird das Flüssigmetall 3 entlang der Bewegungsrichtung  $x$ , gegeben durch eine Höhenerstreckung der Kanäle 3a, in eine zweite Position  $x_2$  bewegt, liegt dort in Serie zu dem elektrischen Widerstandsmittel 5 und bildet mit diesem einen zweiten Strompfad oder Strombegrenzungspfad  
20 31 für einen zu begrenzenden Strom  $I_2$ . Für eine besonders kompakte Anordnung sind der Nennstrompfad 30 und der strombegrenzende zweite Strompfad 31 zueinander parallel und beide senkrecht zu der Höhenerstreckung der Kanäle 3a auf einer variablen, durch die zweite Position  $x_{12}$ ,  $x_2$  des  
25 Flüssigmetalls 3 vorgebbaren Höhe angeordnet.

Bevorzugt umfasst das Widerstandsmittel 5 eine dielektrische Matrix 5, die wandartige Stege 5a zur dielektrischen Trennung einer Mehrzahl von Kanälen 3a für das Flüssigmetall 3 aufweist, wobei die Stege 5a ein dielektrisches  
30 Material mit in der Bewegungsrichtung  $x$  zunehmendem und vorzugsweise nichtlinear zunehmenden Widerstand  $R_x$  aufweisen. Die Stege 5a stellen somit Einzelwiderstände 5a des Widerstandselements 5 dar mit einem entlang der Kanalhöhe zunehmenden und vorzugsweise nichtlinear zunehmenden  
35 elektrischen Widerstand  $R_x$ . Auf Höhe der ersten Position  $x_1$  des Flüssigmetalls 3 sollen die Stege 5a Zwischenelektroden 2c zur elektrisch leitenden Verbindung der Kanäle 3a

aufweisen. Die Kanäle 3a sind vorzugsweise zueinander im wesentlichen parallel angeordnet. Somit wird der strombegrenzende zweite Strompfad 31 gebildet durch eine alternierende Serieschaltung von mit Flüssigmetall 3 gefüllten Kanalbereichen 3a und den Stegen 5a, die als mit ihrer Länge progressive und vorzugsweise nichtlinear progressive Einzelwiderstände 5a des Widerstandselements 5 wirken.

Fig. 2 und 3 zeigen Ausführungsbeispiele, bei denen die bewegliche Elektrode 3, 3' einen Festkörperleiter 3' mit mindestens einem Schleifkontakt 2d umfasst und im ersten Betriebszustand mit den feststehenden Elektroden 2a, 2b, im zweiten Betriebszustand mindestens einseitig mit dem Widerstandselement 5 und im dritten Betriebszustand mindestens einseitig mit dem Isolator 8 elektrisch verbunden wird. Mit Vorteil ist der Festkörperleiter 3' im wesentlichen aus Leichtmetall und/oder in Leichtbauweise, beispielsweise aus metallbeschichtetem Kork, gefertigt und/oder ist der Schleifkontakt 2d zur Reibungsverminderung mit Flüssigmetall benetzt. Fig. 2 zeigt ein Ausführungsbeispiel, bei dem der Festkörperleiter 3' an einem Ende drehbar mit der Eingangselektrode 2a verbunden ist und am anderen Ende mit dem Schleifkontakt gleitfähig entlang eines kreisbogenförmigen Widerstandselements 5 bewegbar ist. Fig. 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel, bei dem der Festkörperleiter 3, 3' an beiden Ende Schleifkontakte 2d aufweist und zwischen wandartigen Widerständen 5a des Widerstandsmittels 5 wie ein Schwebebalken auf seiner ganzen Länge durch die elektromagnetische Wechselwirkung gegen eine Rückstellkraft  $F_r$ , insbesondere gegen die Schwerkraft, angehoben werden kann. Die Wegpositionen  $l_1$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$  des Schleifkontakts 2d entsprechen den zuvor genannten zweiten Positionen  $x_1$ ,  $x_{12}$ ,  $x_2$  der Flüssigmetallsäule 3. Die extremale zweite Position  $l_{12}$  kann in dem Bereich liegen, wo das Widerstandsmittel 5 in einen Isolator 8 übergeht, so dass eine Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung vorhanden ist.

Bei einem Übergang von der ersten Position  $x_1$ ,  $l_1$  zur zweiten Position  $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$ , insbesondere zu einer extremalen zweiten Position  $x_2$ ,  $l_2$ , wird das Flüssigmetall 3 oder der Festkörperleiter 3' mit Schleifkontakt 2d entlang des Widerstandselements 5 geführt. Zur Erzielung einer sanften Strombegrenzungs- oder Abschaltcharakteristik weist das Widerstandselement 5 einen entlang der Bewegungsrichtung  $x$ ,  $l$  der beweglichen Elektrode 3, 3' nichtlinear ansteigenden elektrischen Widerstand  $R_x$ ,  $R_l$  für den zweiten Strompfad 31 auf. Das Widerstandselement 5 soll einen ohmschen Anteil aufweisen und ist bevorzugt rein ohmsch mit einem elektrischen Widerstand  $R_x$ ,  $R_l$ , der kontinuierlich mit der zweiten Position  $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$  ansteigt. Für eine lichtbogenfreie Kommutation des Stroms  $i(t)$  von den feststehenden Elektroden 2a, 2b, 2c zum Widerstandselement 5 soll eine typische, vom Kontaktmaterial abhängige, minimale Lichtbogenzündspannung von 10 V - 20 V nicht überschritten werden.

Es können auch zwei Strombegrenzer 1 mit gegenphasig wirksamer Auslösung der Elektrodenbewegung hintereinander geschaltet sein, um in jeder Stromhalbwelle eine Strombegrenzung und gegebenenfalls Stromabschaltung zu erreichen.

Fig. 4 zeigt eine Variante des Strombegrenzers 1, bei welcher ein Einfangbehälter 3b zur Aufnahme des Flüssigmetalls 3 und zur Schaffung einer Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung vorhanden ist. Zudem kann, wie dargestellt, eine Zuführung 3c für Flüssigmetall 3 zum Auffüllen des Flüssigmetalls 3 in den Kanälen 3a und zum Wiederanschalten der Vorrichtung 1 vorhanden sein. Zudem ist zusätzlich zum Nennstrompfad 30 und zum Strombegrenzungspfad 31 eine Isolationsstrecke 32 vorhanden, auf welcher die Stege 5a zur Strombegrenzung in Stege 8a zur Stromisolation übergehen. Die Isolationsstege 8a bestehen im wesentlichen aus Isolationsmaterial, sind vorzugsweise im Bereich des Einfangbehälters 3c angeordnet und bilden zusammen mit den durch das eingefangene Flüssigmetall 3 entleerten Kanälen die Isolationsstrecke 32. Hierbei ist

also das Flüssigmetall 3 zwischen dem Nennstrompfad 30, dem Strombegrenzungspfad 31 und der Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung bewegbar, so dass ein integrierter strombegrenzender Schalter 1 auf Flüssigmetallbasis realisiert ist. Vorteilhaft sind der erste Strompfad 30 für Betriebsstrom  $I_1$ , der zweite Strompfad 31 zur Strombegrenzung und die Isolationsstrecke 32 im wesentlichen senkrecht zur Bewegungsrichtung  $x$  und/oder im wesentlichen parallel zueinander angeordnet. Dies ergibt eine besonders einfache Konfiguration für einen integrierten Strombegrenzer - Leistungsschalter 1, der ausschliesslich mit Flüssigmetall 3 arbeitet.

Fig. 5 zeigt für den strombegrenzenden Schalter 1 eine Dimensionierung des elektrischen Widerstands  $R_x$ ,  $R_1$  als Funktion der zweiten Position  $x_{12}$ ,  $l_{12}$  der beweglichen Elektrode 3, 3'. Mit Vorteil wird der Widerstand  $R_x$ ,  $R_1$  bis zu einer extremalen zweiten Position  $x_2$ ,  $l_2$  auf einen Maximalwert  $R_x(x_2)$ ,  $R_1(l_2)$  nichtlinear ansteigend gewählt. Auch soll für ein gegebenes Spannungsniveau der Maximalwert  $R_x(x_2)$ ,  $R_1(l_2)$  des elektrischen Widerstands  $R_x$ ,  $R_1$  nach Massgabe eines zu begrenzenden Stroms  $I_2$  auf einen endlichen Wert oder zur Abschaltung des Betriebsstroms  $I_1$  auf einen dielektrischen Isolationswert bemessen werden.

Der elektrische Widerstand  $R_x$ ,  $R_1$  als Funktion  $R_x(x_{12})$ ,  $R_1(l_{12})$  der zweiten Position  $x_{12}$ ,  $l_{12}$  sowie eine Weg-Zeit Charakteristik  $x_{12}(t)$ ,  $l_{12}(t)$  der beweglichen Elektrode 3, 3' entlang der Bewegungsrichtung  $x$ ,  $l$  sollen so gewählt werden, dass in jeder zweiten Position  $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$  der beweglichen Elektrode 3, 3' das Produkt aus elektrischem Widerstand  $R_x$ ,  $R_1$  und Strom  $I_2$  kleiner als eine Lichtbogenzündspannung  $U_b$  zwischen der beweglichen Elektrode 3, 3' und den feststehenden Elektroden 2a, 2b und gegebenenfalls Zwischenelektroden 2c ist und/oder dass eine hinreichende Steilheit der Strombegrenzung zur Beherrschung netzbedingter Kurzschlussströme  $i(t)$  erzielt wird.



In allen zuvor genannten Ausführungsbeispielen umfassen die elektromagnetischen Antriebsmittel 2a, 2b, 20; 11;  $B_{int}$ ,  $B_{ext}$  Magnetfeldmittel 2a, 2b, 20; 11 zur Erzeugung des Magnetfeldes  $B_{ext}$ ,  $B_{int}$ , welches auf die von dem Strom  $I_1$ ,  $I_2$  durchflossene bewegliche Elektrode 3, 3' eine Lorenzkraft  $F_{mag}$  mit einer Kraftkomponente parallel zur Bewegungsrichtung  $x$ , 1 ausübt, so dass die bewegliche Elektrode 3, 3' zwischen dem ersten Strompfad 30 für Betriebsstrom  $I_1$ , dem zweiten Strompfad 31 zur Strombegrenzung und der Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung bewegbar ist. Die Magnetfeldmittel 2a, 2b, 20; 11 können die Stromzuführung 2a, 2b; 20 zur Strombegrenzungsvorrichtung 1 umfassen, um ein internes, vom zu begrenzenden Überstrom  $I_2$  abhängiges Magnetfeld  $B_{int}$  zu erzeugen. Zudem können die Magnetfeldmittel 2a, 2b, 20; 11 Mittel 11 zur Erzeugung eines externen regelbaren und insbesondere umschaltbaren Magnetfeldes  $B_{ext}$  umfassen.

Im Zusammenhang mit Fig. 5 wird beispielhaft die Dimensionierung eines Flüssigmetall-Strombegrenzers 1 diskutiert. Zur Beherrschung von Kurzschlüssen ist ein von Stromnetzparametern und dem Durchbruchverhalten der zu trennenden Kontakte 2a, 2b abhängiger Widerstand  $R_x$  der Strombegrenzung notwendig. Je grösser die Steilheit des Kurzschlussstroms  $i(t)$  ist, um so niedriger muss  $R_x$  gewählt werden. Im ungünstigsten Fall sind die maximale Kurzschlussstrom-Amplitude und die maximale Kurzschlussstrom-Induktivität anzunehmen. Dann gilt:

$$R_x(t) \cdot i(t) < U_b(t) \quad (G1)$$

$$R_x(t) \cdot i(t) + L \cdot di/dt(t) = U_N(t) \quad (G2)$$

wobei  $t$ =Zeitvariable,  $L$ =Netzinduktivität im Kurzschlussfall,  $U_N$ =Betriebs- oder Netzspannung,  $d/dt$  gleich erste und  $d^2/dt^2$  gleich zweite Zeitableitung. In Gleichung (G2) wurde angenommen, dass der Widerstand im Netz  $R_{Netz} \ll L$  ist und die Netzspannung  $U_N$  bei Kurzschluss aufrechterhalten wird. Ferner gilt die Bewegungsgleichung (G3) für das Flüssigmetall 3 mit der Masse  $m$ , der Position oder Auslenkung



$x_{12}(t)$ , dem Reibungskoeffizienten  $\alpha$  und der antreibenden Kraft  $F$

$$m \cdot d^2x_{12}/dt^2 + \alpha \cdot dx_{12}/dt(t) = F - F_r, \quad (G3)$$

wobei  $F_r$ =Rückstellkraft, insbesondere  $F_r=F_g+F_{cap}$  mit  $F_g=m \cdot g$  gleich Gravitationskraft, wobei  $m$ =Masse des Flüssigmetalls 3 und  $g$ =Erdbeschleunigung, und  $F_{cap}$  gleich Kapillarkraft.

In Fig. 5 wurde beispielhaft eine elektromagnetische Lorenzkraft  $F=F_{mag}$  angenommen, die durch Selbstwechselwirkung des zu begrenzenden Stroms  $i(t)$  auf das Flüssigmetall 3 ausgeübt wird. Dann gilt zusätzlich

$$F = k \cdot i^2(t) \quad (G4)$$

mit  $k$ =geometrieabhängige Proportionalitätskonstante. Bei externem Magnetfeld  $B$  gilt  $F = k' \cdot i(t)$  mit  $k'$ =weitere Proportionalitätskonstante. Im Detail hängen  $k$  und  $k'$  von der Geometrie des Strombegrenzers 1, insbesondere der Struktur und Anordnung des Widerstandselements 5 sowie der Strompfade 30, 31 und der Isolationsstrecke 32, ab und von der Anordnung der Magnetfeldmittel 2a, 2b, 20.

In Fig. 5 wurden beispielhaft angenommen: eine kurzschlussbedingte Stromsteilheit  $di/dt=15$  kA/ms,  $U_N=1$  kV,  $I_1=1$  kA, maximaler Kurzschlussstrom  $I_2=50$  kA sowie plausible Parameterwerte für  $k$ ,  $m$  und  $\alpha$ . Dann ergeben sich durch Lösen der Gleichungen (G2)-(G4) unter der Randbedingung (G1) der Widerstand  $R_x(t)$  und die Weg-Zeitcharakteristik  $x_{12}(t)$  des Flüssigmetalls 3 und schliesslich durch Elimination der Zeitabhängigkeit der Widerstand  $R_x(x_{12})$  als Funktion der zweiten Position  $x_{12}$ , wie in Fig. 5 logarithmisch dargestellt. Ausgehend von der ersten Position  $x_1$ , d. h. bei Ablösung des Flüssigmetalls 3 von den Festelektroden 2a, 2b, 2c, nimmt  $R_x$  zunächst überproportional mit der zweiten Position  $x_{12}$  zu, steigt dann linear in einer Phase, in welcher die in der Netzinduktivität  $L$  gespeicherte Energie absorbiert werden muss und geht dann in einem Bereich, in dem der Strom  $i$  bereits begrenzt ist und grössere  $R_x$  tolerabel werden, wieder in einen steileren, d. h. überproportionalen Anstieg  $R_x(x_{12})$  über.

Der Gesamtwiderstand des Strombegrenzers 1 wird im ersten Betriebszustand bei Nominalstrom  $I_1$  durch die Flüssigmetallstrecken 3 determiniert und kann demzufolge durch Bereitstellung eines geeigneten Flüssigmetallquerschnitts auf vorgebbare Werte festgelegt werden. Der maximale Widerstand  $R_x(x_{12})$  des Strombegrenzers 1 kann durch Wahl des Widerstandsmaterials 5 und durch seine geometrische Gestalt nach Massgabe eines gewünschten Spannungsniveaus und maximal zulässigen Überstroms  $I_2$  dimensioniert werden.

Insbesondere kann ein mit der Wegstrecke  $x$  nichtlinear ansteigender Widerstand  $R_x$  durch Materialien mit unterschiedlichen spezifischen Widerständen realisiert werden. Ein nichtlinear ansteigender Gesamtwiderstand  $R_x$  kann auch durch eine geeignete geometrische Führung des Strompfades in einem Widerstandselement mit homogenem spezifischen Widerstand realisiert sein. Die nichtlineare Graduierung des Widerstands  $R_x$  kann auch durch Kombination beider Massnahmen, nämlich durch eine geeignete geometrische Stromführung in einem Widerstandselement mit variablem spezifischen Widerstand, erreicht werden.

Der Schwellwertstrom  $I_{th}$ , ab dem die Strombegrenzungsvorrichtung 1 aktiviert wird, tritt auf, wenn die elektromagnetische Antriebskraft  $F_{mag}$  die Rückstellkraft  $F_r$  überschreitet. In den Ausführungsbeispielen gemäss Fig. 1a, 1b, 4 und 6 ist die Rückstellkraft  $F_r = F_g + F_{cap}$ . Daraus kann  $I_{th}$  abgeschätzt werden zu

$$I_{th} = [(F_g + F_{cap}) / k]^{1/2} \quad (G6)$$

Im vereinfachten Fall, in dem die Kapillarkräfte  $F_{cap}$  vernachlässigbar sind und das Magnetfeld durch eine Spulengeometrie erzeugt wird, gilt

$$I_{th} = [(A \cdot g \cdot d \cdot \rho) / (\mu \cdot N)]^{1/2} \quad (G7)$$

wobei  $A$ =Querschnittsfläche der Flüssigmetall-Kanäle 3a,  $\rho$ =Massendichte des Flüssigmetalls 3,  $d$ =Länge der magnetfelderzeugenden Spule in der Stromzuführung 2a, 2b, 20,  $\mu$ =magnetische Permeabilität in der Spule bzw. im Flüssigmetall und  $N$ =Anzahl Windungen der Spule. Die Reaktionszeit

$t_u$  bis zur vollen Strombegrenzung, d. h. bis zum Erreichen der Endposition gemäss Fig. 1b (oder auch Fig. 2 oder Fig. 3), kann durch geeignete Dimensionierung der Magnetfeldmittel 2a, 2b, 20, 11 und der Rückstellkräfte  $F_g$ ,  $F_{cap}$  auf vorgebbare Werte dimensioniert werden.

Fig. 1b zeigt die Position des Flüssigmetalls 3 im Strombegrenzungsfall. Aufgrund der wirksam werdenden Strombegrenzung nimmt die elektromagnetische Kraft  $F_{mag}$  auf das Flüssigmetall 3 ab und das Flüssigmetall 3 fliesst unter der Wirkung der Gravitationskraft  $F_g$  wieder zurück in die Ausgangsposition zwischen die Elektroden 2a, 2b, 2c. Die Wiedereinschaltzeit  $t_d$  kann unter der Annahme, dass die Kapillarkraft  $F_{cap}$  und die elektromagnetische Kraft  $F_{mag}$  bei begrenztem Strom  $i$  vernachlässigbar sind, abgeschätzt werden zu

$$t_d = [(2 \cdot h) / g]^{1/2} \quad , \quad (G8)$$

wobei  $h = x_2 - x_1$  = Höhe der Flüssigmetall-Kanäle 3a.

Die Wiedereinschaltzeit  $t_d$  kann durch eine geeignete Auslegung des Strombegrenzers 1 an die Erfordernisse verschiedener Anwendungsfälle angepasst werden. Insbesondere sind die Kanalhöhe  $h$  und die Kapillarkräfte  $F_{cap}$  beeinflussende Grössen wie Kanal-Querschnittsfläche  $A$ , Kanalgeometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Kanäle, sowie die Art des Flüssigmetalls 3 entsprechend zu wählen.

Bei der thermischen Auslegung des Strombegrenzers 1 ist zu beachten, dass wegen der kurzen Reaktionszeiten und auch Wiederanschaltzeiten das Widerstandselement 5 nicht wirksam gekühlt werden kann. Die dissipierte Energie  $E_{loss}$  erhitzt den Strombegrenzer 1. Der Temperaturanstieg  $\Delta T$  beträgt näherungsweise

$$\Delta T = E_{loss} / (A \cdot l \cdot \rho' \cdot c') \quad , \quad (G9)$$

wobei  $A$  = Querschnittsfläche der Flüssigmetallteile (wie zuvor),  $l$  = Gesamtlänge des Strombegrenzers 1 oder des Widerstandselements 5,  $\rho'$  = mittlere Massendichte des Strombegrenzers 1 und  $c'$  = mittlere Wärmekapazität des Strombegrenzers 1. Die Verlustenergie  $E_{loss}$  ist im vorliegenden

Fall der resistiven Strombegrenzung viel kleiner als bei Strombegrenzung durch Lichtbogen. Ein wesentlicher Vorteil des verteilten oder matrixartigen Widerstandselements 5 besteht auch darin, dass die Verlustleistung  $E_{\text{loss}}$  weitgehend homogen verteilt über das Volumen des Strombegrenzers 1 auftritt und dementsprechend die gesamte thermische Masse oder Wärmekapazität zur Absorption der Verlustenergie  $E_{\text{loss}}$  ausgeschöpft werden kann.

Fig. 6 zeigt einen kombinierten Flüssigmetall-Strombegrenzer 1 und Flüssigmetall-Leistungsschalter 1 mit elektromagnetischen Antriebsmitteln 2a, 2b, 20; 11;  $B_{\text{int}}$ ,  $B_{\text{ext}}$  für das Flüssigmetall 3. Das Magnetfeld  $B_{\text{int}}$  kann intern durch den zu- oder abführenden Stromleiter 20 und/oder bevorzugt durch eine externe, bezüglich ihrer Magnetfeldrichtung umschaltbare Magnetfeldquelle  $B_{\text{ext}}$  erzeugt werden. Bei einer Verschiebung des Flüssigmetalls 3 in positive Bewegungsrichtung  $+x$  wird der Strom  $i$  auf dem Strombegrenzungspfad 31 geführt und wie oben diskutiert begrenzt. Alternativ kann das Flüssigmetall 3 in einem dritten Betriebszustand entlang der entgegengesetzten Bewegungsrichtung  $-x$  in mindestens eine dritte Position  $x_{13}$ ,  $x_3$  bewegt werden, wobei das Flüssigmetall 3 in der mindestens einen dritten Position  $x_{13}$ ,  $x_3$  in Serie mit einem Isolator 8 liegt und dadurch eine Isolationsstrecke 32 zur Leistungsabschaltung durch die Vorrichtung 1 gebildet wird. Wie dargestellt kann die Isolationsstrecke 8 durch eine Mehrzahl von Isolationsstegen 8a gebildet sein, die im Abschaltfall in alternierender Serieschaltung mit den nach unten verschobenen Flüssigmetallsäulen 3 stehen.

Fig. 3 zeigt gestrichelt den analogen Fall für negative Auslenkungen 1 und Positionen  $l_{13}$ ,  $l_3$  eines beweglich aufgehängten Festkörperleiters 3'. Insbesondere wird der dritte Betriebszustand durch einen Abschaltbefehl ausgelöst, durch den ein externes Magnetfeld  $B_{\text{ext}}$  zwischen einem Betrieb der Vorrichtung 1 als Strombegrenzer und als Leistungsschalter umgeschaltet wird. Als Flüssigmetall 3 geeignet sind z. B. Quecksilber, Gallium, Cäsium, GaInSn.

Mit Vorteil ist die mindestens eine Isolationsstrecke 32 zur Stromabschaltung oberhalb des zweiten Strompfads 31 und/oder unterhalb des ersten Strompfads 30 angeordnet. Dadurch wird eine kompakte Anordnung des Flüssigmetalls 3 und seines Antriebmechanismus 12 relativ zu den zu schaltenden Strömen, insbesondere zum Nennstrompfad 30, Strombegrenzungspfad 31 und Stromabschaltungspfad 32, realisiert. Auch kann der Strombegrenzer 1 in Fig. 6 auch als strombegrenzender Schalter 1, wie zuvor beschrieben, ausgelegt sein.

Anwendungen der Vorrichtung 1 betreffen u.a. den Einsatz als Strombegrenzer, strombegrenzender Schalter und/oder Leistungsschalter 1 in Stromversorgungsnetzen, als selbsterholende Sicherung oder als Motorstarter. Die Erfindung umfasst auch eine elektrische Schaltanlage, insbesondere eine Hoch- oder Mittelspannungsschaltanlage, gekennzeichnet durch eine Vorrichtung 1 wie oben beschrieben.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

	1	Flüssigmetall-Strombegrenzer
20	2a, 2b	Festmetall-Elektroden, Metallplatten, feststehende Elektroden
	2c	Zwischenelektroden
	2d	mechanischer Schleifkontakt mit wegabhängigem Widerstand
25	20	Stromzuführung, Stromleiter
	3	Flüssigmetall
	3a	Kanäle für Flüssigmetall
	3b	Einfangbehälter für Flüssigmetall
	3c	Zuführung für Flüssigmetall
30	30	Strompfad für Betriebsstrom, erster Strompfad
	31	Strompfad für Strombegrenzung, zweiter Strompfad
	32	Stromunterbrechungspfad, Isolationsstrecke
	4	Flüssigmetall-Behälter
	5	Widerstandselement für Strombegrenzung, Widerstandsmatrix für Flüssigmetall
35		



	5a	Einzelwiderstände
	6	Behälterdeckel, Gehäusewand, Isolator
	8	Isolator für Stromunterbrechung
	8a	Einzelisolatoren
5	9	flexible Membran
	10	Ventil für Flüssigmetallzuführung
	11	Magnetfeldsteuerung
	124	Gegendruckbehälter, gefangenes Gasvolumen
10	$\alpha$	Reibungskoeffizient
	$B_{\text{ext}}, B_{\text{int}}$	externes, internes Magnetfeld
	$F_{\text{mag}}$	magnetische Kraft
	$F_r$	Rückstellkraft
	$i$	Strom
15	$I_1$	Betriebsstrom
	$I_2$	begrenzter Überstrom
	$k$	Proportionalitätskonstante
	$l, l_1, l_2, l_{12}, l_3, l_{13}$	Schleifkontaktpositionen
	$L$	Netzinduktivität
20	$P_1, P_2, P_3$	Gasdruck
	$R_x, R_1$	Widerstand des Strombegrenzers
	$t$	Zeitvariable
	$U_b$	Lichtbogenzündspannung
	$U_N$	Netzspannung, Betriebsspannung
25	$V_1, V_2, V_3$	Gasvolumen
	$x, x_1, x_2, x_{12}, x_3, x_{13}$	Positionen der Flüssigmetallsäule

## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Strombegrenzung (1) mit einer Strombegrenzungsvorrichtung (1), die feststehende Elektroden (2a, 2b) und mindestens eine bewegliche Elektrode (3, 3') umfasst, wobei in einem ersten Betriebszustand zwischen den feststehenden Elektroden (2a, 2b) ein Betriebsstrom ( $I_1$ ) auf einem ersten Strompfad (30) durch die Strombegrenzungsvorrichtung (1) geführt wird und der erste Strompfad (30) zumindest teilweise durch die in einer ersten Position ( $x_1, l_1$ ) befindliche bewegliche Elektrode (3, 3') geführt wird, wobei in einem zweiten Betriebszustand die mindestens eine bewegliche Elektrode (3, 3') selbsttätig durch eine elektromagnetische Wechselwirkung mit einem zu begrenzenden Überstrom ( $I_2$ ) entlang einer Bewegungsrichtung ( $x, l$ ) in mindestens eine zweite Position ( $x_{12}, x_2, l_{12}, l_2$ ) bewegt wird, die bewegliche Elektrode (3, 3') bei einem Übergang von der ersten Position ( $x_1, l_1$ ) zur zweiten Position ( $x_{12}, x_2, l_{12}, l_2$ ) entlang eines Widerstandselements (5) geführt wird und in der mindestens einen zweiten Position ( $x_{12}, x_2, l_{12}, l_2$ ) in Serie mit dem Widerstandselement (5) liegt und dadurch ein strombegrenzender zweiter Strompfad (31) durch die Strombegrenzungsvorrichtung (1) gebildet wird, der einen vorgebbaren elektrischen Widerstand ( $R_x, R_1$ ) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass in einem dritten Betriebszustand die bewegliche Elektrode (3, 3') in Serie mit einem Isolator (8) liegt und dadurch eine Isolationsstrecke (32) zur Leistungsabschaltung durch die Vorrichtung (1) gebildet wird.
2. Das Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der dritte Betriebszustand durch einen Abschaltbefehl ausgelöst wird, durch den ein externes Magnetfeld ( $B_{ext}$ ) zwischen einem Betrieb der Vorrichtung (1) als Strombegrenzer und als Leistungsschalter umgeschaltet wird.

3. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in dem dritten Betriebszustand
- a) die bewegliche Elektrode (3, 3') entlang einer entgegengesetzten Bewegungsrichtung ( $-x$ ,  $-l$ ) in mindestens eine dritte Position ( $x_{13}$ ,  $x_3$ ,  $l_{13}$ ,  $l_3$ ) bewegt wird und
  - b) die bewegliche Elektrode (3, 3') in der mindestens einen dritten Position ( $x_{13}$ ,  $x_3$ ,  $l_{13}$ ,  $l_3$ ) in Serie mit dem Isolator (8) liegt.
4. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) die bewegliche Elektrode (3, 3') selbsttätig durch die elektromagnetische Wechselwirkung mit dem zu begrenzenden Überstrom ( $I_2$ ) entlang des Widerstandselements (5) zu einer extremalen zweiten Position ( $x_2$ ,  $l_2$ ) geführt wird und
  - b) die extremale zweite Position ( $x_2$ ,  $l_2$ ) in einem Bereich liegt, wo das Widerstandselement (5) in den Isolator (8) übergeht, so dass die Isolationsstrecke (32) zur Stromabschaltung gebildet wird.
5. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) das Widerstandselement (5) zur Erzielung einer sanften Abschaltcharakteristik mit einem entlang der Bewegungsrichtung ( $x$ ,  $l$ ) der beweglichen Elektrode (3, 3') nichtlinear ansteigenden elektrischen Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) für den zweiten Strompfad (31) gewählt wird und/oder
  - b) das Widerstandselement (5) ohmsch ist und der elektrische Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) kontinuierlich mit der zweiten Position ( $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$ ) ansteigt.
6. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) der zweite Betriebszustand durch den Überstrom ( $I_2$ ) selbsttätig aktiviert wird, indem die stromdurch-

- flossene bewegliche Elektrode (3, 3') durch eine elektromagnetische Kraft ( $F_{\text{mag}}$ ) bewegt wird, die senkrecht zum Strom ( $I_2$ ) durch die bewegliche Elektrode (3, 3') und senkrecht zu einem Magnetfeld ( $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$ ) steht und die eine Kraftkomponente parallel zur Bewegungsrichtung ( $x$ ,  $l$ ) aufweist, wobei
- 5        b) das Magnetfeld ( $B_{\text{ext}}$ ,  $B_{\text{int}}$ ) als ein externes Magnetfeld ( $B_{\text{ext}}$ ) und/oder als ein internes, von einer Stromzuführung (2a, 2b; 20) zur Strombegrenzungsvorrichtung (1) erzeugtes Magnetfeld ( $B_{\text{int}}$ ) gewählt wird.
- 10
7. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der elektrische Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) als Funktion ( $R_x(x_{12})$ ,  $R_l(l_{12})$ ) der zweiten Position ( $x_{12}$ ,  $l_{12}$ ) sowie eine Weg-Zeit Charakteristik ( $x_{12}(t)$ ,  $l_{12}(t)$ ) der beweglichen Elektrode (3, 3') entlang der Bewegungsrichtung ( $x$ ,  $l$ ) so gewählt werden, dass
- 15
- a) in jeder zweiten Position ( $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$ ) der beweglichen Elektrode (3, 3') das Produkt aus elektrischem Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) und Strom ( $I_2$ ) kleiner als eine Lichtbogenzündspannung ( $U_b$ ) zwischen der beweglichen Elektrode (3, 3') und den feststehenden Elektroden (2a, 2b) und gegebenenfalls Zwischen-
- 20
- elektroden (2c) ist und/oder
- 25
- b) eine hinreichende Steilheit der Strombegrenzung zur Beherrschung netzbedingter Kurzschlussströme ( $i(t)$ ) erzielt wird.
- 30
8. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) die bewegliche Elektrode (3, 3') ein Flüssigmetall (3) umfasst, das in mindestens einem Kanal (3a) der Strombegrenzungsvorrichtung (1) angeordnet wird und entlang einer Höhenerstreckung des Kanals (3a) zwischen dem ersten Strompfad (30) für den Betriebsstrom ( $I_1$ ), dem zweiten Strompfad (31) zur Strombe-
- 35

grenzung und der Isolationsstrecke (32) zur Stromabschaltung bewegt werden kann und

- b) insbesondere dass mehrere Kanäle (3a) durch wandartige Stege (5a, 8a) voneinander getrennt sind, die im Bereich des ersten Strompfads (30) Zwischenelektroden (2c) zum Durchleiten des Betriebsstroms ( $I_1$ ) aufweisen, im Bereich des zweiten Strompfads (31) Einzelwiderstände (5a) des Widerstandselements (5) aufweisen und im Bereich der Isolationsstrecke (32) in Stege (8a) zur Stromisolation übergehen.

9. Das Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

- a) die bewegliche Elektrode (3, 3') einen Festkörperleiter (3') mit mindestens einem Schleifkontakt (2d) umfasst und im ersten Betriebszustand mit den feststehenden Elektroden (2a, 2b), im zweiten Betriebszustand mindestens einseitig mit dem Widerstandselement (5) und im dritten Betriebszustand mindestens einseitig mit dem Isolator (8) elektrisch verbunden wird und

- b) insbesondere dass der Festkörperleiter (3') im wesentlichen aus Leichtmetall und/oder in Leichtbauweise gefertigt ist und/oder der Schleifkontakt (2d) zur Reibungsverminderung mit Flüssigmetall benetzt wird.

10. Vorrichtung zur Strombegrenzung (1), insbesondere zur Ausführung des Verfahrens nach einem der vorangehenden Ansprüche, umfassend feststehende Elektroden (2a, 2b) und mindestens eine bewegliche Elektrode (3, 3'), wobei in einem ersten Betriebszustand zwischen den feststehenden Elektroden (2a, 2b) ein erster Strompfad (30) für einen Betriebsstrom ( $I_1$ ) durch die Strombegrenzungsvorrichtung (1) vorhanden ist und der erste Strompfad (30) zumindest teilweise durch die in einer ersten Position ( $x_1$ ,  $l_1$ ) befindliche bewegliche Elektrode (3, 3') führt, wobei elektromagnetische Antriebsmittel (2a, 2b, 20; 11;  $B_{int}$ ,  $B_{ext}$ ) zum bei Über-



strom ( $I_2$ ) selbstbetätigten Bewegen der beweglichen Elektrode (3, 3') entlang einer Bewegungsrichtung ( $x$ , 1) in mindestens eine zweite Position ( $x_{12}$ ,  $x_2$ ,  $l_{12}$ ,  $l_2$ ) vorhanden sind, elektrische Widerstandsmittel (5) mit einem vorgebbaren elektrischen Widerstand ( $R_x$ ) vorhanden sind und in einem zweiten Betriebszustand die bewegliche Elektrode (3, 3') zumindest teilweise in Serie zu den Widerstandsmitteln (5) liegt und zusammen mit diesen einen zweiten Strompfad (31) bildet, auf dem der Betriebsstrom ( $I_1$ ) auf einen zu begrenzenden Strom ( $I_2$ ) begrenztbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass in einem dritten Betriebszustand die bewegliche Elektrode (3, 3') in Serie mit einem Isolator (8) liegt und dadurch eine Isolationsstrecke (32) zur Leistungsabschaltung durch die Vorrichtung (1) vorhanden ist.

11. Die Vorrichtung (1) nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die elektromagnetischen Antriebsmittel (2a, 2b, 20; 11;  $B_{int}$ ,  $B_{ext}$ ) Magnetfeldmittel (2a, 2b, 20; 11) zur Erzeugung eines Magnetfeldes ( $B_{ext}$ ,  $B_{int}$ ) umfassen, welches auf die von dem Strom ( $I_1$ ,  $I_2$ ) durchflossene bewegliche Elektrode (3, 3') eine Lorenzkraft ( $F_{mag}$ ) mit einer Kraftkomponente parallel zur Bewegungsrichtung ( $x$ , 1) ausübt, so dass die bewegliche Elektrode (3, 3') zwischen dem ersten Strompfad (30) für Betriebsstrom ( $I_1$ ), dem zweiten Strompfad (31) zur Strombegrenzung und der Isolationsstrecke (32) zur Stromabschaltung bewegbar ist.

12. Die Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 10-11, dadurch gekennzeichnet, dass

a) die Magnetfeldmittel (2a, 2b, 20; 11) eine Stromzuführung (2a, 2b; 20) zur Strombegrenzungsvorrichtung (1) umfassen, um ein internes, vom zu begrenzenden Überstrom ( $I_2$ ) abhängiges Magnetfeld ( $B_{int}$ ) zu erzeugen und/oder

b) die Magnetfeldmittel (2a, 2b, 20; 11) Mittel (11) zur Erzeugung eines externen regelbaren Magnetfeldes ( $B_{ext}$ ) umfassen.

5 13. Die Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 10-12, dadurch gekennzeichnet, dass

a) das Magnetfeld ( $B_{ext}$ ,  $B_{int}$ ) nach Massgabe eines zu begrenzenden Überstroms ( $I_2$ ) und einer hierfür erforderlichen Weg-Zeit Charakteristik ( $x(t)$ ,  $l(t)$ ) der beweglichen Elektrode (3, 3') im zweiten Strompfad (31) ausgelegt ist und/oder

10 b) die Widerstandsmittel (5) zur lichtbogenfreien Strombegrenzung einen entlang der Bewegungsrichtung ( $x$ ,  $l$ ) bis zu einer extremalen zweiten Position ( $x_2$ ,  $l_2$ ) nichtlinear zunehmenden elektrischen Widerstand ( $R_x$ ,  $R_l$ ) für den zweiten Strompfad (31) aufweisen.

14. Die Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 10-13, dadurch gekennzeichnet, dass

20 a) die bewegliche Elektrode (3, 3') ein Flüssigmetall (3) umfasst, das durch die Magnetfeldmittel (2a, 2b, 20; 11) im flüssigen Aggregatzustand bewegt wird und/oder

25 b) die bewegliche Elektrode (3, 3') einen Festkörperleiter (3') mit mindestens einem Schleifkontakt (2d) umfasst, wobei der Festkörperleiter (3') durch die Magnetfeldmittel (2a, 2b, 20; 11) gegen eine Rückstellkraft ( $F_r$ ), insbesondere gegen die Schwerkraft, einseitig oder beidseitig angehoben wird.

30 15. Die Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 10-14, dadurch gekennzeichnet, dass

35 a) der erste Strompfad (30 für Betriebsstrom ( $I_1$ ), der zweite Strompfad (31) zur Strombegrenzung und die Isolationsstrecke (32) zur Stromabschaltung im wesentlichen senkrecht zur Bewegungsrichtung ( $x$ ,  $l$ ) und/oder im wesentlichen parallel zueinander angeordnet sind und/oder

- b) die mindestens eine Isolationsstrecke (32) zur Stromabschaltung oberhalb des zweiten Strompfads (31) und/oder unterhalb des ersten Strompfads (30) angeordnet ist.
- 5 16. Elektrische Schaltanlage, insbesondere Hoch- oder Mittelspannungsschaltanlage, gekennzeichnet durch eine Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 10-15.

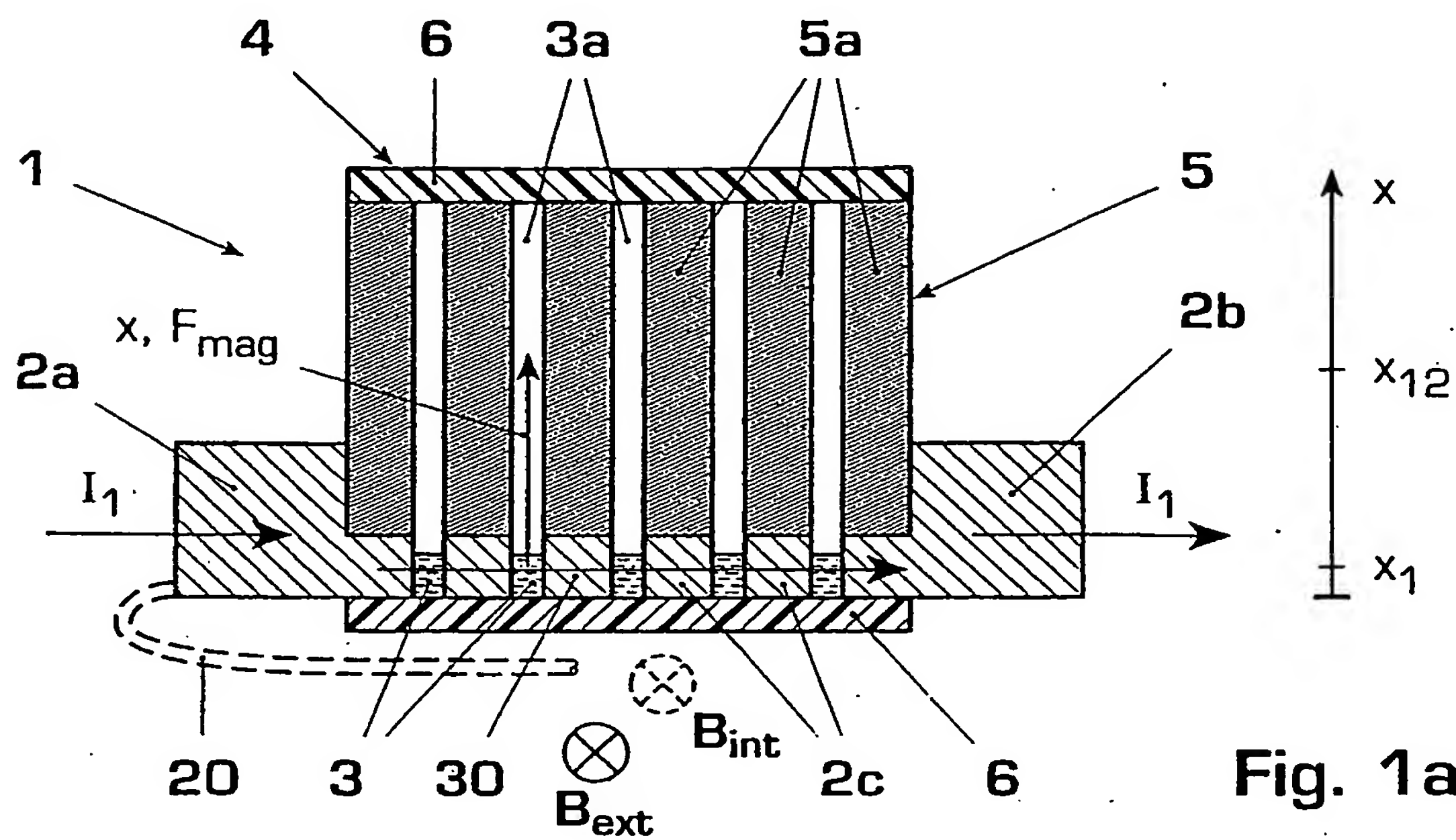


Fig. 1a

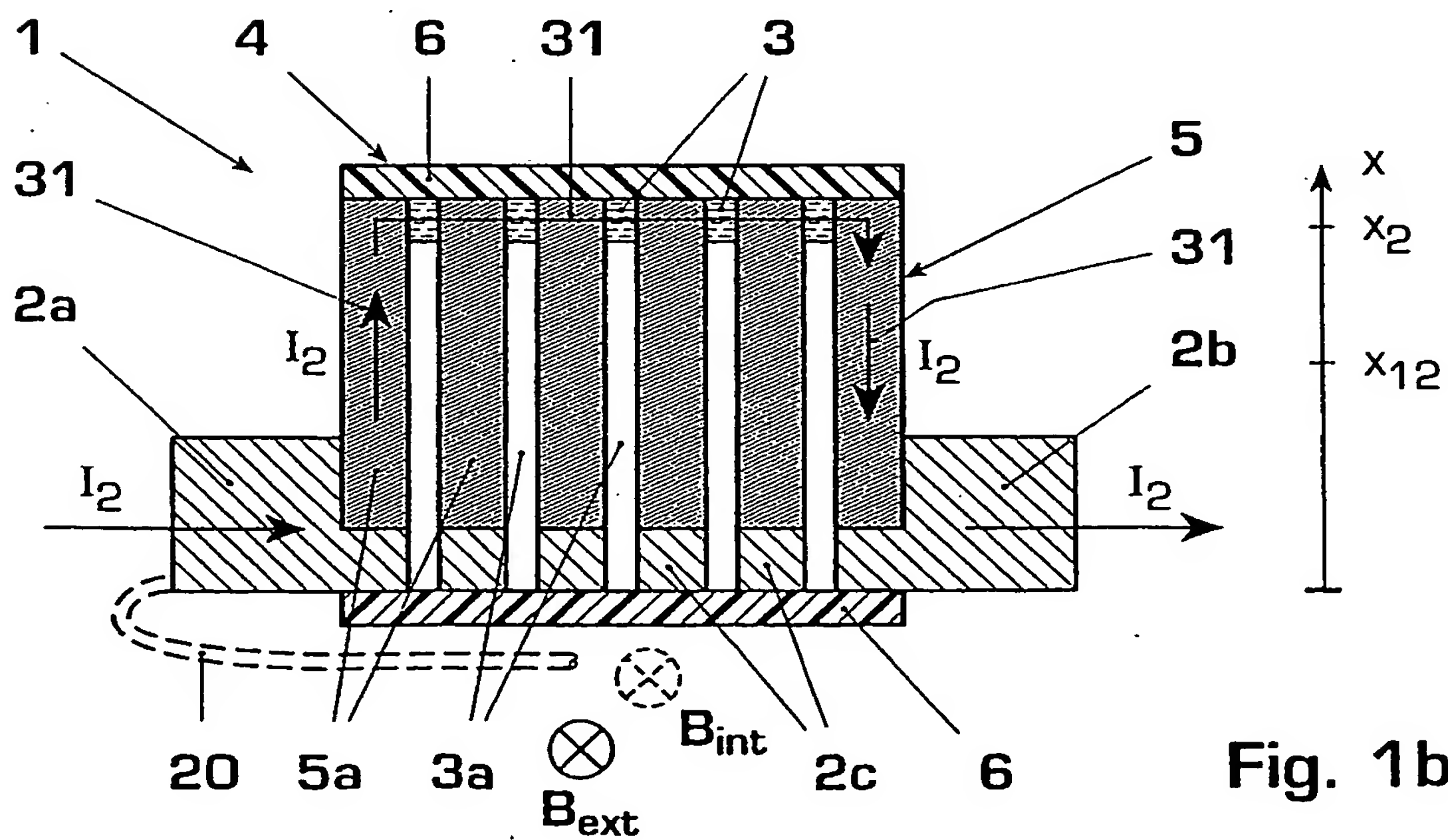


Fig. 1b

2 / 4

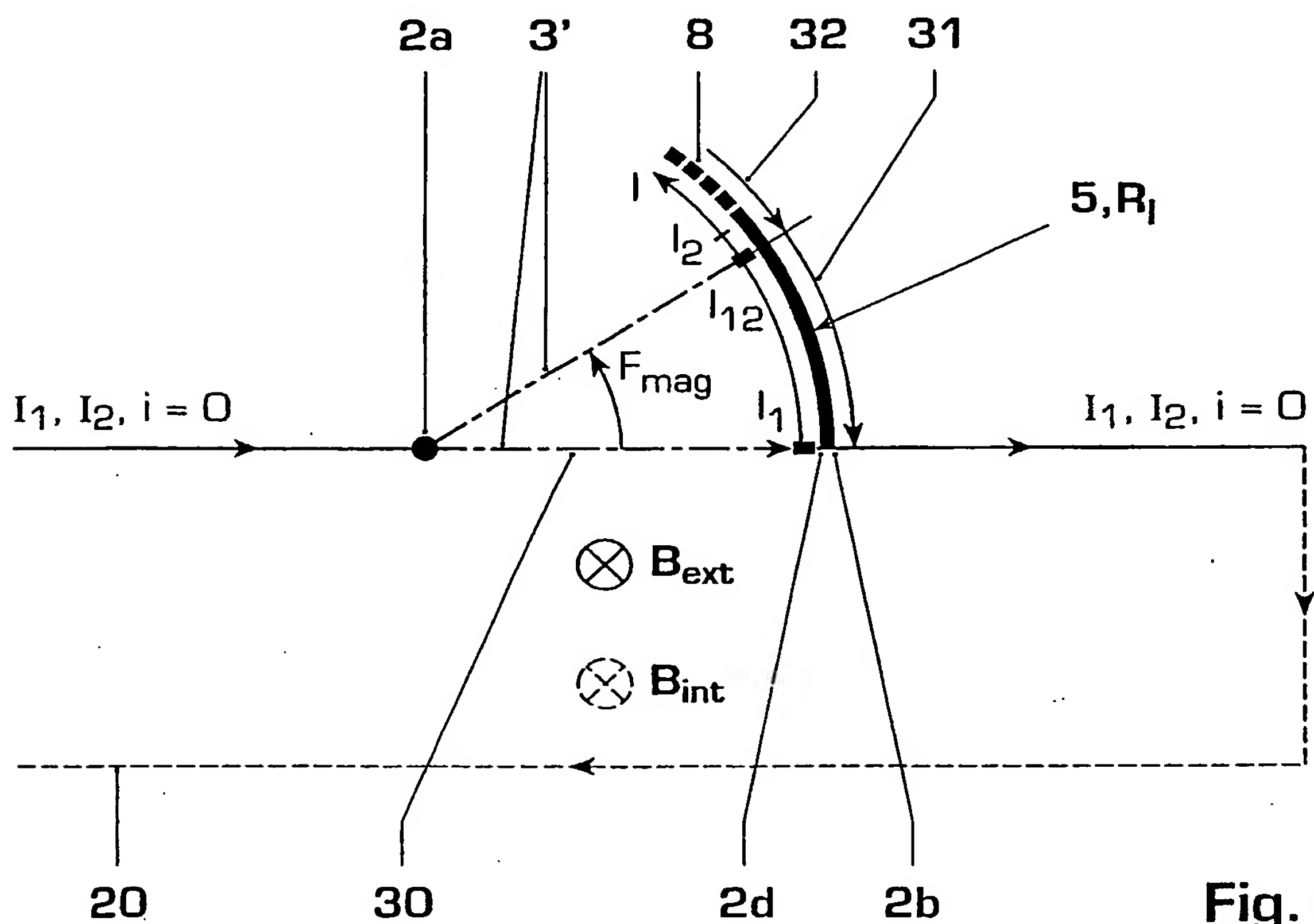


Fig. 2

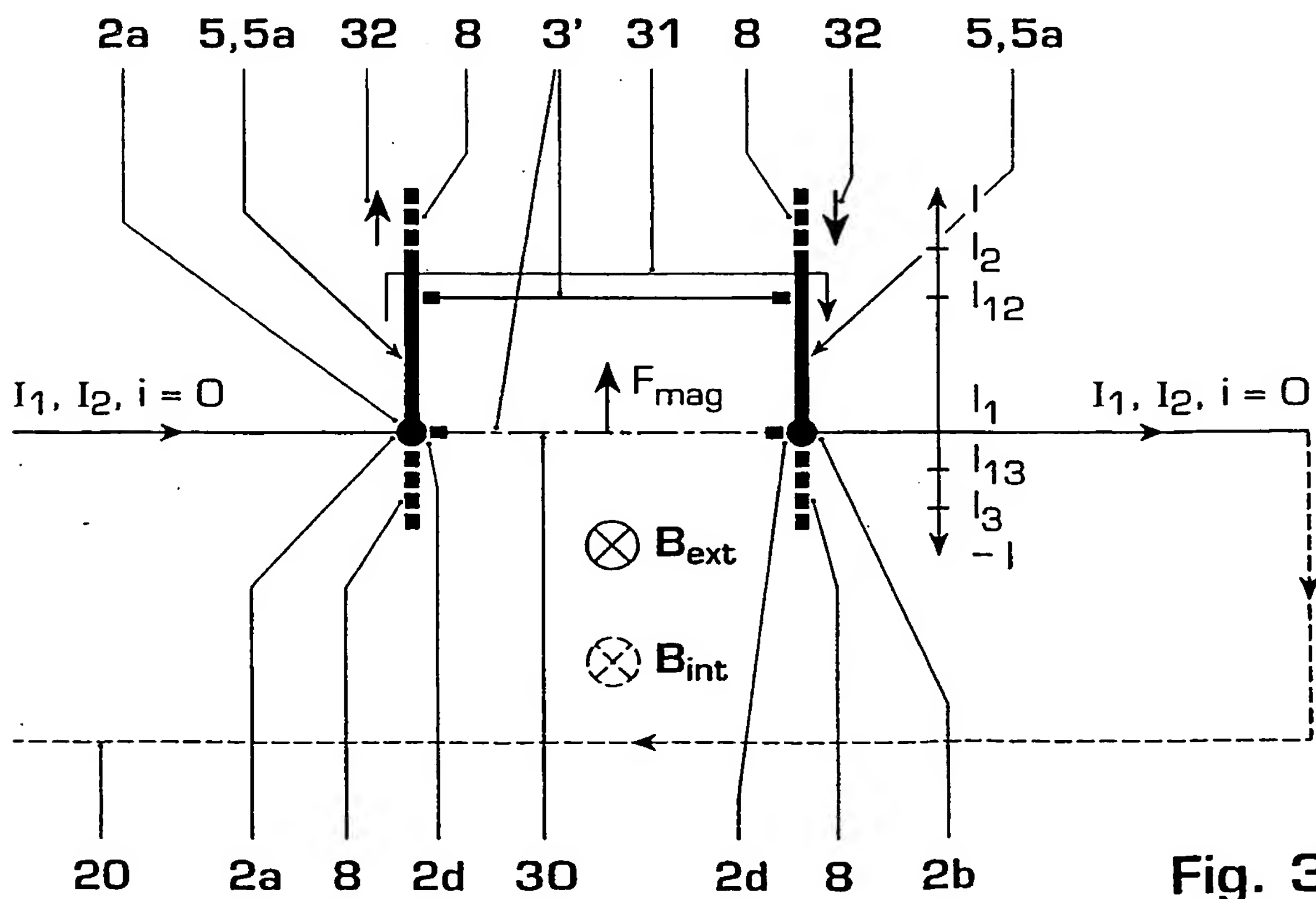
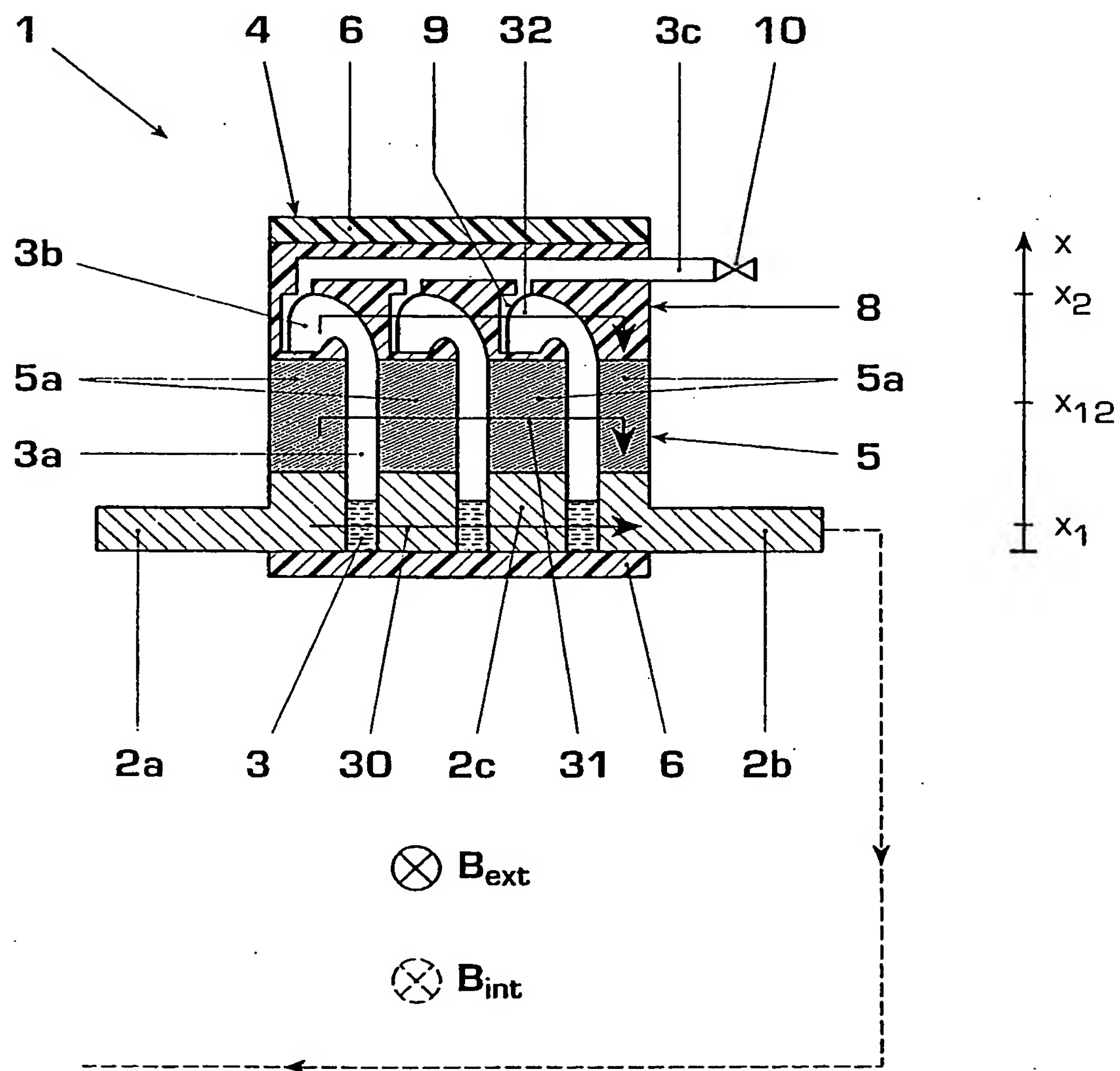


Fig. 3





**Fig. 4**

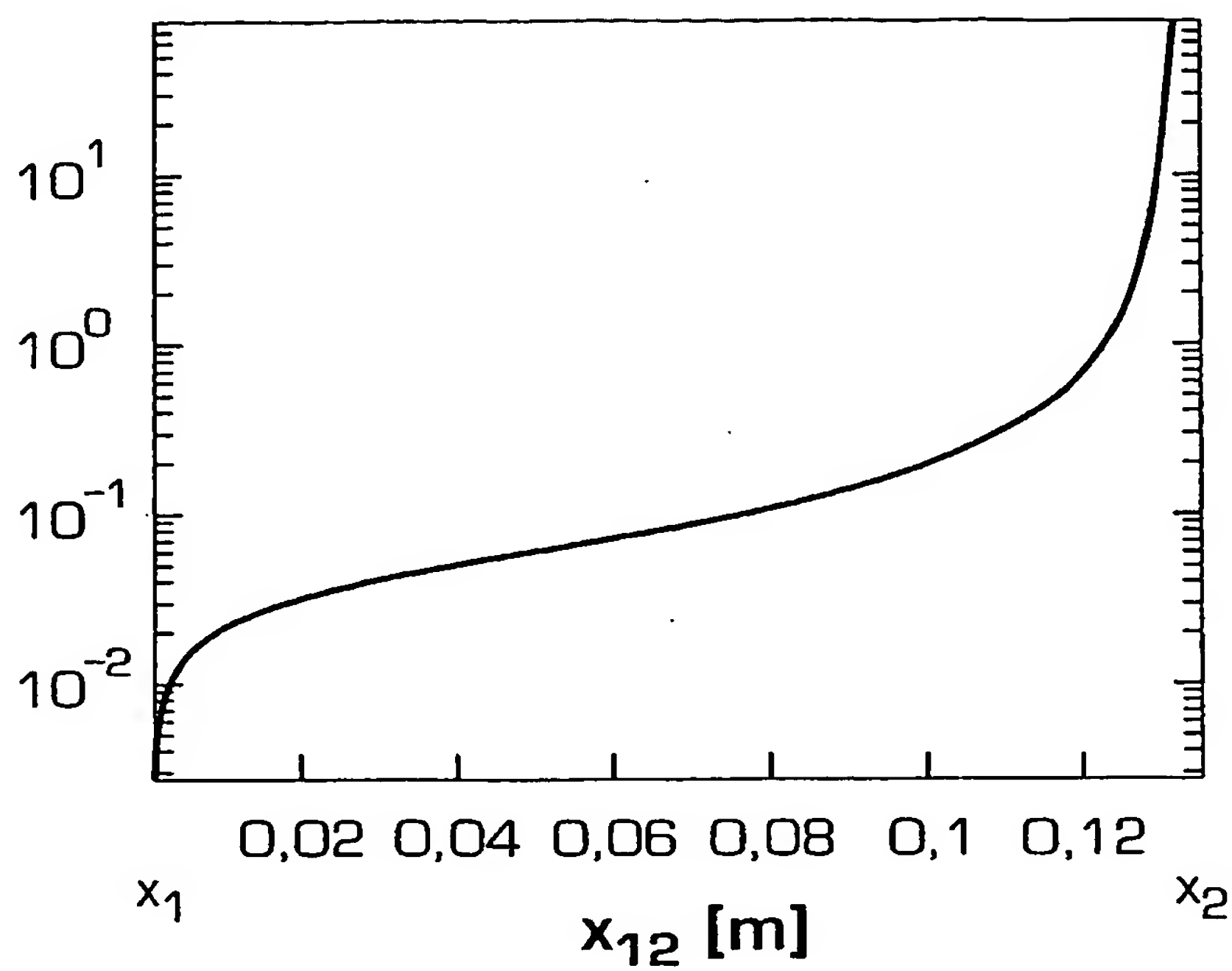
$R [\Omega]$ 

Fig. 5

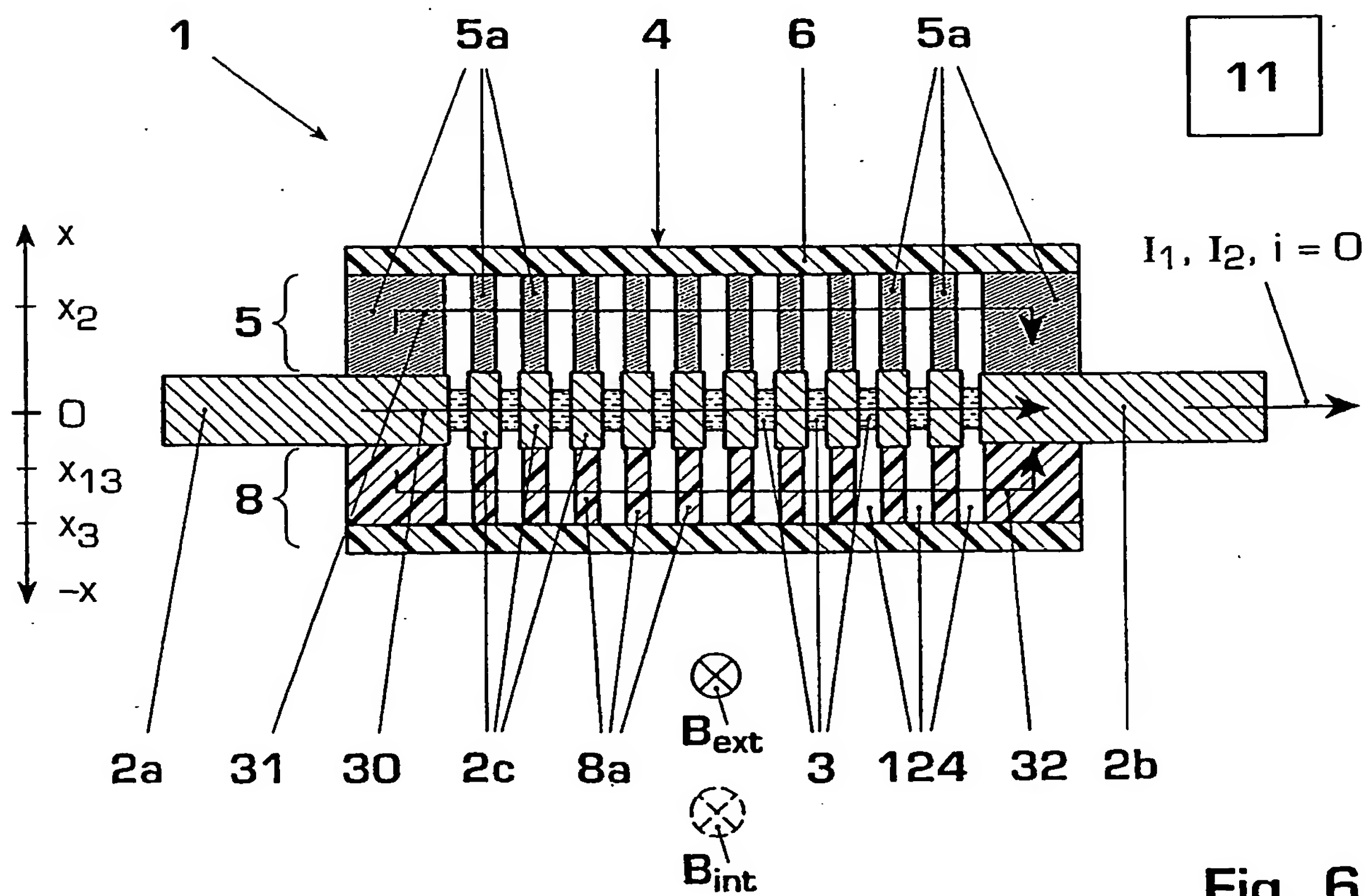


Fig. 6

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/CH2004/000417

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT-MATTER

IPC 7 H01H77/10

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H01H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	GB 1 206 786 A (CNRS, FRANCE) 30 September 1970 (1970-09-30) the whole document	1-16
A	US 4 599 671 A (FOX RUSSELL E ET AL) 8 July 1986 (1986-07-08) the whole document	1-16
A	US 4 598 332 A (KEMENY GEORGE A) 1 July 1986 (1986-07-01) the whole document	1,10



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 September 2004

Date of mailing of the international search report

08/10/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Ruppert, H

# BEST AVAILABLE COPY

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/CH2004/000417

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
GB 1206786	A	30-09-1970	FR 1503721 A	01-12-1967
			CH 469340 A	28-02-1969
			DE 1615915 B1	24-09-1970
			US 3474339 A	21-10-1969
US 4599671	A	08-07-1986	NONE	
US 4598332	A	01-07-1986	NONE	

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/CH2004/000417

## A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 H01H77/10

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 H01H

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	GB 1 206 786 A (CNRS, FRANCE) 30. September 1970 (1970-09-30) das ganze Dokument	1-16
A	US 4 599 671 A (FOX RUSSELL E ET AL) 8. Juli 1986 (1986-07-08) das ganze Dokument	1-16
A	US 4 598 332 A (KEMENY GEORGE A) 1. Juli 1986 (1986-07-01) das ganze Dokument	1, 10

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

\*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

\*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

\*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

\*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

\*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*&amp;\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

28. September 2004

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

08/10/2004

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Ruppert, H



## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/CH2004/000417

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
GB 1206786	A	30-09-1970	FR 1503721 A 01-12-1967
		CH 469340 A 28-02-1969	
		DE 1615915 B1 24-09-1970	
		US 3474339 A 21-10-1969	
US 4599671	A	08-07-1986	KEINE
US 4598332	A	01-07-1986	KEINE

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☐ **FADED TEXT OR DRAWING**

☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**